

文章编号: 1001-3806(2016)06-0860-06

基于双向二级喇曼抽运的偏振控制研究

袁明, 秦祖军*, 杨凯

(桂林电子科技大学 电子工程与自动化学院, 桂林 541004)

摘要: 为了发展具有实用价值的受激喇曼全光偏振控制方法, 根据光纤中受激喇曼散射矢量理论和光纤随机双折射效应设计了基于双向二级喇曼抽运的全光偏振控制方案, 构建了偏振吸引理论模型, 采用严格数值迭代算法对该偏振控制方案进行了仿真分析, 并完成了偏振控制方案最佳工作性能的优化设计。结果表明, 当信号光波长为 1550nm、功率为 0.1mW、一级抽运光和二级抽运光的功率分别为 1W 和 4W、其偏振态都为 (0, 1, 0)、光纤长度为 3km 时, 信号光偏振度可达 0.85 以上, 且信号光强度波动低于 35%。该方案有效降低了作用光波功率、减弱了信号光输出强度噪声, 并提高了信号光输出偏振度。

关键词: 光纤光学; 受激喇曼散射; 偏振相关增益; 偏振吸引; 二级放大

中图分类号: TN252

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.06.018

Rerearch of polarization control based on bi-propagating dual-order Raman pump

YUAN Ming, QIN Zujun, YANG Kai

(School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: In order to develop a practical all-optical polarization control tool, according to vector stimulated Raman scattering theory and random birefringence effect of optical fibers, a scheme of all-optical polarization control was proposed based on bi-propagating dual-order Raman pump. After the establishment of the theoretical model solved by rigorous numerical method, the optimal design of the polarization control scheme was completed. The results show that when signal wavelength is 1550nm, signal power is 0.1mW, pump light P_1 and P_2 power are 1W and 4W, and their polarization states are (0, 1, 0), fiber length is 3km, the degree of polarization of signal light could be more than 0.85, and the intensity fluctuations of signal light are less than 35%. The proposed method is effective to reduce the power of the interacting light wave, weaken the intensity noise of output optical signal and improve the degree of polarization of optical signals.

Key words: fiber optics; stimulated Raman scattering; polarization-dependent gain; polarization attraction; dual-order amplification

引言

随着高速光纤通信与全光网络技术的发展, 光波的偏振特性制约着诸多基于光波偏振相关性的集成光子器件的发展。目前, 开发基于光波偏振效应的新型光子器件已成为光纤技术领域中的热点问题^[1-6], 其核心在于实现对光波偏振态的有效控制。光纤由于在拉制过程中不均匀、残存的应力等造成其内部产生不规则随机双折射效应, 以及由于环境因素和机械振动等

影响, 光纤中传输的光波偏振态将随传输距离而发生随机变化。偏振控制能将任意偏振态输入的光波转换为所期望的偏振态输出。起偏器是最简单的偏振控制器, 它能使入射的信号光波转成确定偏振态输出; 其缺点是仅使某一偏振分量通过, 存在损耗, 且输入信号光偏振态的波动会导致其输出光强不平稳, 产生相对强度噪声。因此, 有必要研究和发展无损耗、低输出强度波动和低功耗的偏振控制方法, 实现偏振相关光子信号的处理。

基于光纤非线性偏振吸引效应的全光偏振控制得到学者广泛关注, 被认为是光子技术领域高精度偏振控制极有前景的解决方案^[2,4,7]。其中, 基于光纤受激喇曼散射偏振相关增益特性是其中重要的一项技术。研究表明, 喇曼增益偏振相关性使不同偏振态的信号光获得不同的非线性增益: 若信号光偏振态与抽运光偏振态平行, 则获得最大增益; 若两者偏振态正交, 增益最小, 最大增益与最小增益差即为光纤的偏振相关

基金项目: 广西自然科学基金资助项目 (2013GXNSFBA019269; 2014GXNSFAA118389); 桂林电子科技大学广西自动检测技术与仪器重点实验室基金资助项目 (YQ14107)

作者简介: 袁明 (1991-), 男, 硕士研究生, 现主要从事光纤通信和光纤传感的研究。

* 通讯联系人。E-mail: 674265337@qq.com

收稿日期: 2015-10-23; 收到修改稿日期: 2015-11-12

增益 (polarization dependent gain, PDG)。利用该特性可产生对信号光的偏振吸引效应,即具有随机偏振输入的信号光在光纤中与具有确定注入偏振态的抽运光经受激喇曼散射 (stimulated Raman scattering, SRS) 作用后,其输出偏振态被抽运光所“吸引”。通过改变抽运光的偏振方向,可以将任意偏振态输入的信号光转换为目标偏振态输出,实现全光偏振控制。目前,基于喇曼抽运的全光偏振控制结构主要包括同向喇曼抽运放大和反向喇曼抽运放大。在同向抽运偏振吸引方案中,抽运光与信号光在光纤中同向传输,抽运光偏振态由于随机双折射影响而在光纤中随机演化,致使“被吸引”的信号光输出偏振态复杂化和不稳定^[8-10]。在反向抽运结构中,信号光的输出偏振态“被吸引”至与反向输入的抽运光偏振态相同,能够克服输出信号光偏振态的不可预知性。但是该方案最大的缺陷在于能耗大,一般需要 8W 或以上的抽运功率,难以实用化,同时存在严重的相对强度噪声(信号光输出强度波动高达 50% 以上)^[11-13]。

本文中利用光纤中受激喇曼散射偏振相关增益 (SRS-PDG) 特性,设计了基于双向二级喇曼抽运的全光偏振控制方案。根据光纤中受激喇曼散射矢量理论和光纤随机双折射效应构建了偏振吸引理论模型,用严格数值迭代算法对该偏振控制方案进行了仿真分析,并完成了偏振控制方案最佳工作性能的优化设计。结果表明,在实现相同信号光偏振度输出情况下,该方案相对于传统单级放大方案可以有效降低作用光功率和信号光输出强度噪声。

1 结构设计与理论模型

1.1 双向二级喇曼抽运的全光偏振控制方案设计

为使输出信号光获得较高的偏振度,降低所需抽运功率和输出光强波动,设计了一种基于双向二级喇曼抽运的偏振控制结构。该结构的基本思想是:附加一级喇曼抽运光对二级喇曼抽运光进行偏振吸引,克服单级喇曼抽运结构中抽运光在光纤中偏振态的随机演化,进而提高喇曼偏振吸引效果降低所需抽运光功率,具体如图 1 所示。信号光 S (斯托克斯矢量为 s_1, s_2 和 s_3) 与一级抽运光 P_1 (斯托克斯矢量为 p_{11}, p_{12} 和 p_{13}) 从正向注入,二级抽运光 P_2 (斯托克斯矢量为 p_{21}, p_{22} 和 p_{23}) 反向注入;其中,一级抽运光 P_1 对二级抽运光 P_2 放大,二级抽运光 P_2 对信号光 S 进行喇曼放大与偏振吸引(P_1 和 P_2 均具有确定的输入偏振态)。图 1 中,邦加球上每一个小点代表信号光 S 一个特定的偏振态,在光纤中经过非线性偏振吸引作用后,邦加球上偏振随机分布的 S 将被 P_2 “吸引”而汇聚到一起,其

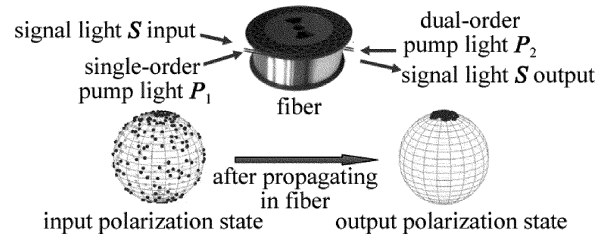


Fig. 1 Structure of bi-propagating dual-order Raman pump
输出偏振度、偏振态的离散分布程度由光纤长度 L, P_1 和 P_2 的输入功率及其偏振态等因素共同决定。

1.2 理论模型

上述偏振吸引效应基于双向二级喇曼抽运结构,须对单抽运喇曼放大理论模型^[14]进行完善,构建基于斯托克斯向量的、光纤中信号光 S 与抽运光 P_1, P_2 共同发生 SRS 非线性效应的矢量理论模型。考虑光纤衰减损耗、喇曼放大、喇曼吸收、光纤随机双折射以及由光波自相位调制 (self phase modulation, SPM) 和交叉相位调制 (cross phase modulation, XPM) 引起的非线性偏振旋转 (nonlinear polarization rotation, NPR) 等因素的影响,描述图 1 所示偏振吸引效应的耦合波模型,可表示为:

$$\frac{dP_1}{dz} = -\alpha_{p,1}P_1 - \frac{\omega_{p,1}}{\omega_{p,2}} \frac{g}{2} [(1+3\mu)P_{p,2}P_1 + (1+\mu)P_{p,1}P_2 - 2\mu P_{p,1}P_{23}] + (\omega_{p,1}b + W_{p,1}) \times P_1 \quad (1)$$

$$\frac{dP_2}{dz} = \alpha_{p,2}P_2 - \frac{\omega_{p,1}}{\omega_s} \frac{g}{2} [(1+3\mu)P_sP_2 + (1+\mu)P_{p,2}S - 2\mu P_{p,2}S_3] - (\omega_{p,2}b + W_{p,2}) \times P_2 - \frac{g}{2} [(1+3\mu)P_{p,1}P_2 + (1+\mu)P_{p,2}P_1 - 2\mu P_{p,2}S_3] \quad (2)$$

$$\frac{dS}{dz} = -\alpha_sS + \frac{g}{2} [(1+3\mu)P_{p,2}S + (1+\mu)P_sP_2 - 2\mu P_sP_{23}] + (\omega_s b + W_s) \times S \quad (3)$$

式中, $P_{p,1}(z) = |P_1(z)|, P_{p,2}(z) = |P_2(z)|$ 和 $P_s(z) = |S(z)|$ 分别为抽运光 P_1 、抽运光 P_2 和信号光 S 的光功率; P_{i3} 和 S_3 分别为抽运光 $P_i (i=1,2)$ 和信号光 S 在斯托克斯空间 \hat{e}_3 轴方向的分量; b 为线性随机双折射矢量 β 与角频率的比值。其余参量定义如下:信号光和抽运光角频率 $\omega_s = 2\pi c/\lambda_s$ 和 $\omega_p = 2\pi c/\lambda_p$; $\alpha_{p,1}, \alpha_{p,2}$ 和 α_s 分别为抽运光 P_1, P_2 和信号光 S 的光纤损耗系数; g 为光纤的喇曼增益系数; μ 为喇曼光纤中信号光-抽运光正交和平行时的喇曼增益值之比,约为 0.012; W_p 和 W_s 分别表示光纤中光波 SPM 和 XPM 引起的 NPR 效应,定义为:

$$W_{p,1} = \frac{2}{3} [\gamma_p P_{13} + 2\gamma_p P_{23} - 2\gamma_p P_2] \quad (4)$$

$$W_{p,2} = \frac{2}{3}[\gamma_p P_{23} + 2\gamma_p S_3 - 2\gamma_p S] \quad (5)$$

$$W_s = \frac{2}{3}[\gamma_s S_3 + 2\gamma_s P_{23} - 2\gamma_s P_2] \quad (6)$$

式中, γ_p 和 γ_s 分别表示抽运光和信号光的光波非线性克尔系数; 线性随机双折射矢量 $\beta = (\beta_1, \beta_2, 0)$, 其元素满足以下 1 阶微分方程:

$$\frac{d\beta_j}{dz} = -\rho\beta_j + \sigma\eta_j, (j = 1, 2) \quad (7)$$

式中, η_j 为零均值标准方差的高斯白噪声函数; $\rho = 1/L_c$; 信号光强度波动 $\sigma = \frac{2\pi}{L_b\sqrt{L_c}}$, 其中 L_b 和 L_c 分别表示光纤拍长和随机双折射的相关长度, 与光纤偏振模色散 (polarization mode dispersion, PMD) 系数 D 的关系为: $D = \frac{16\sqrt{L_c}}{\sqrt{3}\omega_s L_b}$ 。由此可见, 在光纤传输过程中 PMD 和 NPR 均使信号光偏振态偏离抽运光。对于具有不同 PMD 参量的光纤, 其拍长和相关长度不同, 导致线性随机双折射矢量 β 不同。因此, 在光纤传输过程中, 信号光与抽运光的偏振态偏离的速率不相同。当 $D = 0$ 时, 与抽运光偏振态平行的信号光偏振分量获得增益最大, 正交的信号光分量获得增益最小, 二者偏振相关增益最大。随着 D 的增加, 光纤的扰偏性增强, 偏振相关增益逐渐减少, 偏振吸引效果逐渐变差; D 足够大时, 信号光偏振态完全偏离抽运光, 各个方向偏振态的信号光增益完全相同, 此时偏振相关增益近似为零, 偏振吸引效果最差。因此, 要获得较理性的偏振吸引效果, 应选择具有较小 D 值的光纤作为喇曼增益介质。相似地, 由(1)式~(3)式可知, NPR 对信号光偏振吸引具有与 PMD 类似的扰偏负面效果。

1.3 数值分析方法设计

描述信号光偏振吸引的 SRS 矢量方程(1)式~(3)式属于两点边值问题, 其边界条件为: 在 $z = 0$ 处, 信号光 S 和一级抽运光 P_1 的斯托克斯向量已知; 在 $z = L$ 处, 反向传输的二级抽运光 P_2 的斯托克斯向量已知。设计合适的数值算法是分析该双向二级喇曼抽运偏振控制器的关键, 为此设计如下数值迭代算法。该算法一次完整的迭代包含正向积分和反向积分两个过程, 具体步骤为: (1) 在 $z = 0$ 处, 根据光纤的线性衰减对未知的 P_2 确定一个猜测值 $P_2(0)$, 将 $P_1, P_2(0)$ 和 S 作为耦合方程的初始值, 使用龙格-库塔法正向积分至光纤末端 $z = L$ 处, 可得一级抽运光、二级抽运光和信号光的输出斯托克斯向量 $P_{1,+}, P_{2,+}$ 和 S_+ ; (2) 在 $z = L$ 处, 比较 $P_{2,+}$ 与已知的 P_2 值, 得正向积分过程的均方根误差为 $\varepsilon_{L,+}$; (3) 在 $z = L$ 处, 以已知的 P_2 代

替 $P_{2,+}$, 用 $P_{1,+}, P_2$ 和 S_+ 作为耦合方程初始值, 再使用龙格-库塔法反向积分至光纤始端 $z = 0$ 处, 得到 $P_{1,-}, P_{2,-}$ 和 S_- ; (4) 在 $z = 0$ 处, 比较 S_- 与 $S, P_{1,-}$ 与 P_1 , 得反向积分过程的均方根误差为 $\varepsilon_{0,-}$; 完成一次数值迭代; (5) 当 $\varepsilon_{L,+}$ 与 $\varepsilon_{0,-}$ 都低于某个设定的误差容限 (如 0.1%) 时, 迭代完成; 否则用 $P_{2,-}$ 代替 $P_2(0)$, 以 $P_1, P_{2,-}$ 和 S 为初值, 返回步骤(1)进行下一次迭代。每进行一次迭代运算, 猜测值都会得到修正, 更接近真实值, 平均迭代 5、6 次, $\varepsilon_{L,+}$ 与 $\varepsilon_{0,-}$ 即可满足指定设计的误差容限。

2 计算结果与讨论

基于上述算法数值研究了图 1 所示基于双向二级喇曼抽运结构的信号偏振吸引特性。设输入的信号光包含 1000 个随机偏振态, 逐一考虑光纤长度、信号光功率、抽运功率及其偏振态和信号光波长等参量对信号光偏振吸引特性的影响, 最终实现参量的优化设计。研究中, 输出信号光的平均增益定义为 $G = \langle P_s(L) \rangle / P_s(0)$ 、偏振度 (degree of polarization, DOP) 为 $P_{DOP} = (\langle s_1 \rangle^2 + \langle s_2 \rangle^2 + \langle s_3 \rangle^2)^{1/2}$ 和信号光的强度波动为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\langle [P_s(L)]^2 \rangle - \langle [P_s(L)] \rangle^2}{\langle [P_s(L)] \rangle^2}},$$

其中 $\langle s_k \rangle$ ($k = 1, 2, 3$) 表示 1000 个信号光 s_k 分量的统计平均。其它参量定义如下^[8,10]: 光纤拍长 $L_b = 354\text{m}$; 相关长度 $L_c = 10\text{m}$; 偏振模色散系数 $D = 0.0021\text{ps/km}^{1/2}$; 抽运光 P_1 波长 $\lambda_{p,1} = 1365\text{nm}$, 抽运光 P_2 波长 $\lambda_{p,2} = 1455\text{nm}$; 光纤喇曼增益系数 $g = 0.6\text{W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$; 光纤损耗系数 $\alpha_s = 0.2\text{dB/km}$, $\alpha_{p,1} = 0.31\text{dB/km}$, $\alpha_{p,2} = 0.273\text{dB/km}$; 克尔系数 $\gamma_p = 1.24\text{W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, $\gamma_s = 1.06\text{W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。

2.1 光纤长度对信号光增益与偏振度的影响

光纤长度是影响信号光增益与偏振度的一个重要因素^[12]。一定长度范围内, 信号光平均增益随着光纤长度增加而增大, 信号光与抽运光发生的非线性偏振吸引效应越佳, 输出偏振态更加汇聚、偏振度值越大; 但光纤超过某一临界长度后, 由于抽运功率消耗, 输出信号光的增益和偏振度趋于饱和。以抽运光 P_1 的功率 $P_{p,1} = 1\text{W}$ 、偏振态为 $(0, 1, 0)$ 、信号光功率 $P_s = 0.1\text{mW}$ 为例, 图 2 中给出了抽运光 P_2 的功率 $P_{p,2}$ 分别为 $1\text{W}, 2\text{W}$ 和 4W 、偏振态也为 $(0, 1, 0)$ 时, 信号光在不同光纤长度 L 下的平均增益 G (如图 2a 所示) 与 DOP 值 (如图 2b 所示)。如图所示, 当 $L < 3\text{km}$, 随着光纤长度的增加, 信号光增益与偏振度都逐渐增加; 在 L 达到 3km 后, 信号光增益与偏振度趋于饱和, 不再随光

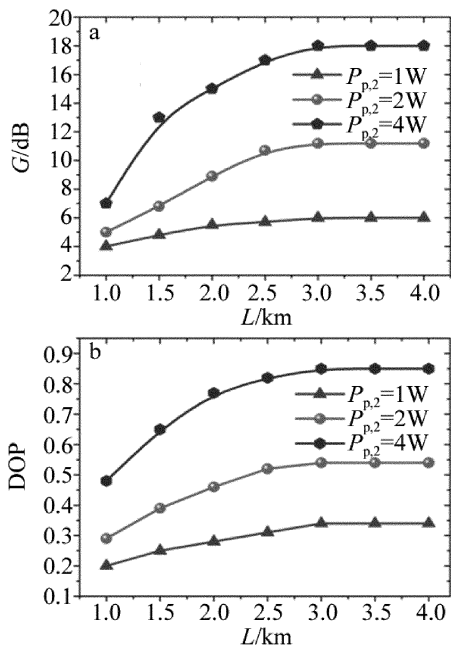


Fig. 2 Average gain and degree of polarization of the signal light under different optical fiber lengths

纤长度的增加而增加。此时 ($L = 3\text{m}$), $P_{p,2}$ 为 1W, 2W 和 4W 时对应的最大信号光增益分别为 6dB, 11.2dB 和 18dB, 最高偏振度分别为 0.34, 0.54 和 0.85。在参考文献[9]中, 抽运功率分别为 1W, 2W 和 4W 时, 信号光增益分别约为 3dB, 7dB 和 14dB; 在参考文献[12]中, 抽运功率分别为 1W, 2W 和 4W 时, 信号光偏振度分别约为 0.25, 0.45 和 0.78。经比较可知, 相对于传统单级放大方案, 双向二级喇曼抽运使信号光平均增益与偏振度都有提高。此外, 比较图 2a 和图 2b 发现, 信号光增益曲线与偏振度曲线相似。该结果表明, 在一定光纤长度范围内信号光的平均增益与偏振度近似符合正比关系: 信号光平均增益越大, 抽运光作用越明显, 喇曼偏振吸引效果越好, 偏振度也越高。当抽运光 P_1 的功率与信号光功率为其它值时, 增益曲线与偏振度曲线与图 2 相似。

2.2 信号光功率对平均增益与偏振度的影响

在 L 达到 3km 后, 信号光增益与偏振度达到最大, 以下分析取 $L = 3\text{km}$, 其它条件不变。信号光入射功率不同, 其增益和偏振度也不相同, 偏振吸引效果也呈现出差异。图 3 为抽运光 P_2 的输入功率 $P_{p,2}$ 分别为 1W, 2W 和 4W 时, 具有不同功率输入情况下信号光获得的平均增益(如图 3a 所示)与偏振度(如图 3b 所示)。由图可知, 随着信号光功率增加, 其增益 G 和 DOP 值均相应降低。本例中, 当信号光功率 $P_s = 0.1\text{mW}$ 时, 增益和偏振度分别可达到 18dB 与 0.85 ($P_{p,2} = 4\text{W}$ 时)。当 L 为其它值时, 增益曲线与偏振度曲线与图 3 相似。

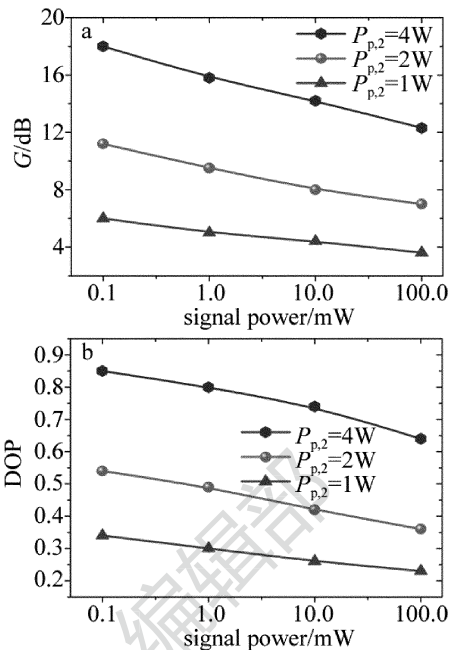


Fig. 3 Gain and degree of polarization of signal light with different powers

2.3 抽运功率对信号光增益的影响

除了光纤长度和信号光功率外, 抽运光功率对喇曼偏振吸引效果亦有影响。根据上述条件结果, 设增益光纤长度 $L = 3\text{km}$, 信号光功率 $P_s = 0.1\text{mW}$, 图 4 显示了不同抽运功率 $P_{p,1}$ 与 $P_{p,2}$ 对信号光偏振度的影响。分析耦合方程(1)式至(3)式可知, 当 $P_{p,2}$ 相对较小 ($P_{p,2} < 8\text{W}$) 时, NPR 的影响很微弱, 可以忽略; 信号光在传输过程中获得抽运光 P_2 的喇曼放大, P_2 的喇曼衰减损耗对信号光偏振吸引具有主导作用。因此, 抽运光 P_2 的功率 $P_{p,2}$ 的大小直接影响着信号光的增益与偏振度^[8]。如图 4 所示, 当抽运光 P_1 的功率一定时, 信号光偏振度随着 $P_{p,2}$ 的增加而增加(比如当 $P_{p,1} = 1\text{W}$, $P_{p,2}$ 从 1W 增加到 4W 时, 信号光偏振度从 0.3 增加到 0.85), 考虑到大功率激光器的成本与使用安全性, $P_{p,2}$ 选取 4W 即可。抽运光 P_1 对抽运光 P_2 进行喇曼放大, 对其光纤衰减和喇曼衰减损耗进行补偿, 但其功率对信号光输出偏振度影响不大, 即对信号光偏振吸引效果影响远小于 P_2 。如图 4 所示, 当 $P_{p,2}$ 一定时, 随着抽运光 P_1 功率的增加, 信号光偏振度只是

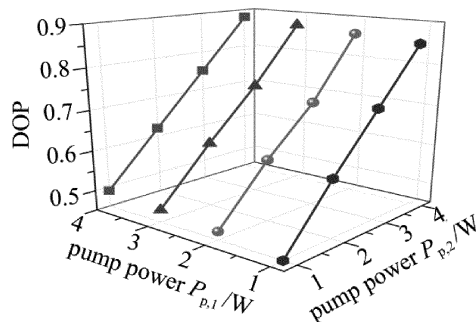


Fig. 4 Effect of different pump powers on the degree of polarization

略微提升(比如当 $P_{p,2} = 4W$, $P_{p,1}$ 从 1W 增加到 4W 时, 信号光偏振度仅仅从 0.85 增加到 0.89)。因此, 为实现以较小的功率代价获得较高的信号光偏振度, $P_{p,1}$ 取 1W 即可。当 $P_{p,1} = 1W$ 和 $P_{p,2} = 4W$, 信号光输出偏振度最高可达到 0.85, 对应的增益为 18dB。当信号光功率 P_s 与光纤长度 L 为其它值时, 增益曲线与偏振度曲线与图 4 相似, 只是 L 越小时, 信号光增益与偏振度随着 $P_{p,2}$ 增加而增加的幅度更加平缓。

2.4 抽运功率与光纤长度对信号光强度波动的影响

偏振相关增益可以实现信号光偏振吸引, 同时也会使不同偏振态输入信号光的输出强度存在波动。偏振相关增益越大, 不同偏振态输入的信号光输出强度波动越明显。光纤长度与抽运功率的变化直接影响信号光强波动的大小。图 5 中给出了信号光强度波动 σ 随着光纤长度与抽运功率 $P_{p,2}$ 的变化。由图可知, $P_{p,2}$ 从 1W 增加至 4W 时, 信号光强度波动逐渐加大, 即 $P_{p,2}$ 越大, 偏振相关增益越大, 信号光输出强度波动也越大。其原因在于, 随着 $P_{p,2}$ 的增加, 与抽运光 P_2 偏振态平行的信号光获得的增益增大, 其输出功率显著提高; 而与抽运光 P_2 偏振态正交的信号光获得的增益相对增加不多, 其输出功率仅略微提升。如图 5 所示, 光纤传输距离也将影响信号光强度波动。光纤越长, 基于偏振相关增益的信号光与抽运光发生非线性偏振吸引效应越充分, 偏振相关增益越大, 信号光输出强度波动越大。但当光纤超过一定长度后, 由于抽运光 P_2 的消耗使之提供的信号光增益有限, 偏振相关增益达到饱和, 强度波动也随之稳定。如图 5 所示, 在 $L > 3km$ 后, 信号光强度波动不再随着光纤长度的增加而增加。在 $L = 3km$, $P_{p,2} = 4W$ 时, σ 最高为 35%; 相比单级喇曼抽运结构, 强度波动大幅减少^[15-16]。此外, 降低抽运光 P_1 的功率与提高信号光初始功率均能一定程度降低信号光输出强度波动。

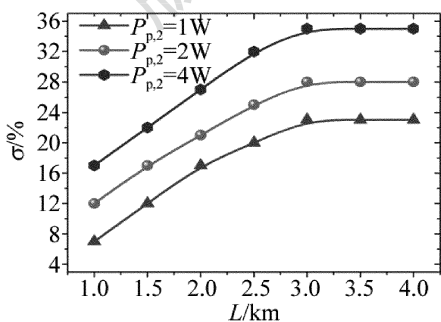


Fig. 5 Fluctuation of signal intensity along with the changes of fiber length and pump power

2.5 一级抽运光偏振态对信号光增益的影响

在图 1 所示偏振吸引方案中, 信号光 S 的偏振态受二级抽运光 P_2 的偏振态影响, 被抽运光 P_2 的偏振

态所“吸引”; 一级抽运光 P_1 直接作用于抽运光 P_2 , 对 P_2 进行偏振吸引。因此, 抽运光 P_1 的偏振态也将间接影响信号光偏振度。以抽运光 P_2 的偏振态为 $(0, 1, 0)$ 为例, 其它条件不变, 图 6a 中邦加球上给出了抽运光 P_1 取不同偏振态时信号光的输出偏振度值(黑点表示 P_1 偏振态, 其数值为此偏振态对应的信号光偏振度)。可以看出, 抽运光 P_1 偏振态不同, 输出信号光的偏振度也并不相同; 当抽运光 P_1 的偏振态与抽运光 P_2 的偏振态同为 $(0, 1, 0)$ 时, 信号光的偏振度最高为 0.85。同样, 以抽运光 P_2 的偏振态 $(\sqrt{2}/2, 0, \sqrt{2}/2)$ 为例, 当抽运光 P_1 的偏振态也为 $(\sqrt{2}/2, 0, \sqrt{2}/2)$ 时, 信号光偏振度达到最高值 0.86, 如图 6b 所示。因此, 通过调节一级抽运光 P_1 的偏振态并使之与二级抽运光 P_2 平行, 可以提高信号光的输出偏振度。

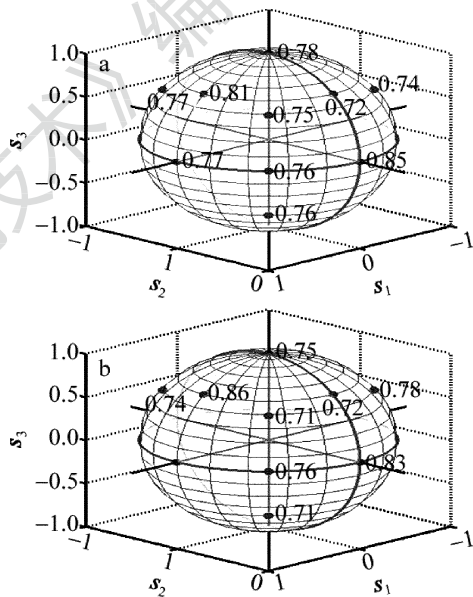


Fig. 6 a—signal polarization degree when P_1 is a special polarization state and P_2 is $(0, 1, 0)$ b—signal polarization degree when P_1 is a special polarization state and P_2 is $(\sqrt{2}/2, 0, \sqrt{2}/2)$

2.6 不同信号波长的增益情况

喇曼光纤放大器具有较宽的放大带宽, 工作在较低损耗的 1550nm 波长窗口, 能提供均衡和稳定的增益。在抽运光频率下移约 13.2THz 附近有一较宽

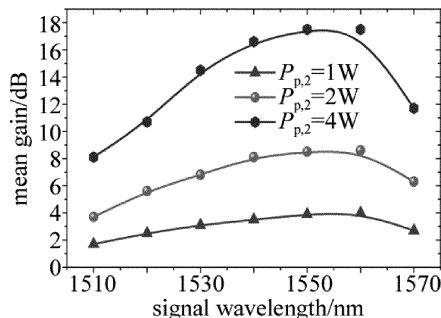


Fig. 7 Relationship between mean gain and signal wavelength

(6THz)的主峰,喇曼增益系数最大,抽运光对信号光偏振吸引效果最佳。图 7 中给出了波长范围为 1510nm ~ 1570nm 时信号光的增益情况:喇曼增益峰值的大小对应于偏振吸引效率的高低。如图所示,信号光波长在 1550nm ~ 1560nm 范围内时,其增益最大,可达 18dB ($P_{p,2} = 4W$ 时)。当波长大于或小于此范围,要达到相同的增益和偏振吸引效果,需更大甚至几倍的抽运功率。因此,选取合适的信号光波长对降低抽运功率、实现高信号光增益与偏振度至关重要。

3 结 论

设计了基于双向二级喇曼抽运的全光偏振控制方案,信号光 S 与一级抽运光 P_1 从正向注入,二级抽运光 P_2 从反向注入;一级抽运光 P_1 对二级抽运光 P_2 放大,二级抽运光 P_2 对信号光 S 进行喇曼放大与偏振吸引。采用数值迭代算法对该方案的偏振吸引性能进行详尽数值研究,分析了光纤长度、信号光功率、抽运光功率及其偏振态、信号光波长对信号光输出偏振度的影响。结果表明,当信号光波长为 1550nm、功率为 0.1mW、抽运光 P_1 的功率为 1W 和抽运光 P_2 功率为 4W 时,其偏振态都为(0,1,0)、光纤长度为 3km 时,信号光偏振度可达 0.85 以上,且信号光强度波动低于 35%。该方案有效降低了作用光功率、减弱了信号光输出强度噪声和提高了信号光输出偏振度,为发展具有实用价值的受激喇曼全光偏振控制方法提供了理论和技术支撑。

参 考 文 献

[1] ZHANG X G. Progress of polarization control technologies in high speed optical fiber communications [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2011, 34(1):1-10(in Chinese).
 [2] MORIN P, FATOME J, FINOT C, *et al.* All-optical nonlinear processing of both polarization state and intensity profile for 40Gbit/s regeneration applications. [J]. Optics Express, 2011, 19(18):17158-17166.
 [3] KOZLOV V V, NUÑO J, WABNITZ S. Theory of lossless polarization attraction in telecommunication fibers[J]. Journal of the Optical So-

ciety America, 2012, 29(1):100-108.
 [4] FATOME J, MORIN P, PITOIS S, *et al.* Light-by-light polarization control of 10Gb/s RZ and NRZ telecommunication signals[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2012, 18(2):621-628.
 [5] ZHANG X G, FANG G Q, ZHAO X Y, *et al.* Experimental research of polarization stabilization in optical fiber communication systems [J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 29(4):888-891 (in Chinese).
 [6] MARTINELLI M, MARTELLI P, PIETRALUNGA S M. Polarization stabilization in optical communications systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(11):4172-4183.
 [7] STILLER B, MORIN P, NGUYEN D M, *et al.* Demonstration of polarization pulling using a fiber-optic parametric amplifier. [J]. Optics Express, 2012, 20(24):27248.
 [8] URSINI L, SANTAGIUSTINA M, PALMIERI L. Raman nonlinear polarization pulling in the pump depleted regime in randomly birefringent fibers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(4):254-256.
 [9] MUGA N J, FERREIRA M F S, PINTO A N. Broadband polarization pulling using Raman amplification. [J]. Optics Express, 2011, 19(19):18707-18712.
 [10] MUGA N J, FERREIRA M F, PINTO A N. Polarization-dependent gain in Raman amplification based all-optical polarization control schemes[C]// Transparent Optical Networks (ICTON), 2012 14th International Conference on IEEE. New York, USA: IEEE, 2012: 1-4.
 [11] GALTAROSSA A, PALMIERI L, SANTAGIUSTINA M, *et al.* Polarized backward Raman amplification in randomly birefringent fibers [J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(11):4055-4063.
 [12] CHIARELLO F, URSINI L, PALMIERI L, *et al.* Polarization attraction in counterpropagating fiber Raman amplifiers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(20):1457-1459.
 [13] PITOIS S, FATOME J, MILLOT G. Polarization attraction using counter-propagating waves in optical fiber at telecommunication wavelengths[J]. Optics Express, 2008, 16(9):6646-6651.
 [14] LIN Q, AGRAWAL G P. Vector theory of stimulated Raman scattering and its application to fiber-based Raman amplifiers[J]. Journal of the Optical Society America, 2003, 20(8):1616-1631.
 [15] KOZLOV V V, WABNITZ S. Suppression of relative intensity noise in fiber-optic Raman polarizers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(15):1088-1090.
 [16] KOZLOV V V, NUÑO J, ANIA-CASTAÑÓN J D, *et al.* Multichannel Raman polarizer with suppressed relative intensity noise for wavelength division multiplexing transmission lines [J]. Optics Letters, 2012, 37(11):2073-2075.